

研究終了報告書

「冷却原子系を用いた量子時空ダイナミクスシミュレータ」

研究期間：2017年10月～2021年3月

研究者：中島 秀太

1. 研究のねらい

近年、量子多体系の物理、量子重力理論、量子情報理論は互いに深く関わり合っていることが分かってきた。この3つの領域にまたがる物理学上の重要な問題が「ブラックホール情報消失問題」であり、最近この問題を解決するカギとして、ブラックホール内では複雑な(量子カオス的な)時間発展が起こり、宇宙で最も早く量子情報が拡散(非局在化)するという「量子情報スクランブリング」という考えが注目されるようになってきた。この考えが正しければ、ブラックホール情報消失問題という(半古典的)重力理論から出てきた難問は、量子多体系における量子カオスと非平衡ダイナミクス、特に情報の非局在化や孤立量子系の熱化といった「量子多体ダイナミクス」の理解を通じて解決できる可能性が出てきた。一方、このような量子多体系のダイナミクスの数値計算は難しく、R. P. Feynman が指摘したような、別の操作性の良い量子系を用いた“シミュレーション”、すなわち「量子シミュレーション」が有効であると期待される。

そこで本研究では、その高い制御性から量子多体系の量子シミュレータとして期待されている光格子中の冷却原子系を構築し、この系の量子非平衡ダイナミクスの量子シミュレーション実現を目指す。特に、光格子中の冷却原子系に対して、量子情報スクランブリングの指標として近年注目されている非時間順序相関関数(out-of-time-ordered correlator, OTOC)を測定することを目指す。さらに、OTOCの測定技術の開発を進める中で、量子多体系の非平衡ダイナミクスの定量評価手法、特に、量子情報の非局在化のような「量子多体系における量子情報ダイナミクス」の研究手法を開拓することを長期的なねらいとする。また、より長期的にはこの冷却原子系の制御性を高めることで、ゲート型量子コンピュータのベンチマークとして使用可能な、冷却原子系による汎用量子カオスシミュレータを実現することをも目指す。

2. 研究成果

(1)概要

本研究では、OTOCの測定が可能となる高い制御性を持つ冷却原子系をゼロから構築することを目指した。OTOCの測定には「時間反転操作」、すなわちハミルトニアン H (～エネルギー)の符号を反転させることが要求される。冷却原子系の大きな特長として(磁場)フェッシュバツハ共鳴と呼ばれる現象があり、これを用いると原子間相互作用エネルギー U はその符号も含めて自在に制御することが可能になる。また、通常の原子気体では運動エネルギーの符号を変えることは出来ないが、レーザー光の定在波で作られた原子に対する周期ポテンシャル(光格子ポテンシャル)中の冷却原子系のハミルトニアン(Hubbard 模型)ではその運動はトンネリングパラメータ t で記述され、トンネリング t の符号は光格子ポテンシャルに周期的な変調を加えることで実効的に反転させることが可能になる。以上のような背景から、本研究では量子シミュレーションを行なう冷却原子種として、広い磁場フェッシュバツハ共鳴を持ち磁場による相互作用の精密制御が可能な原子種であるフェルミ同位体リチウム(${}^6\text{Li}$)原子を選択

し、さらに冷却 ${}^6\text{Li}$ 原子系に光格子を導入するためのレーザーとしては、周期変調のための保持時間中、原子のコヒーレンス時間が 1064 nm 光よりも長いと期待できる 1560 nm 光を選択し、装置の開発を開始した。結果として、本研究期間中に、 ${}^6\text{Li}$ 原子をレーザー冷却するための光学系および冷却 ${}^6\text{Li}$ 原子を安定に保持するための超高真空系を構築、また磁場フェシユバツハ共鳴による相互作用制御にも利用可能な水冷式の大電流コイルを構築し、これらを組み合わせることで、 ${}^6\text{Li}$ 原子のレーザー冷却(3次元磁気光学トラップ)まで達成した。 ${}^6\text{Li}$ 原子のレーザー冷却がまだ量子縮退領域に到達していないため、光格子ポテンシャルの導入やその先の OTOC 測定には至らなかったが、OTOC についての研究論文を持つ理論家の吉井涼輔氏との共同研究(基盤研究(B))をR2年度より開始し、さきがけ期間後の OTOC 測定実現のための準備を着実に進めている。

(2) 詳細

研究テーマ A: 高度制御可能な冷却 Li 原子系の構築

研究者は本研究課題の開始(2017年10月)と同時に、京都大学白眉センターの特定准教授に着任し、本研究課題を遂行するための実験環境・実験装置の構築をゼロから開始した(図1)。実験室の整備(各種工事・光学定盤の設置 etc.)および装置の設計から開始し、まずは Li 原子のレーザー冷却のための周波数安定化レーザーシステムを構築した。他のアルカリ原子と異なり

常温での Li 原子の飽和蒸気圧は非常に低く、原子吸収信号を得るために専用のオープンチャンバーを構築、modulation transfer 分光法により自作のフィルタ型外部共振器レーザー(波長 671 nm)の周波数安定化を実現した。並行して、冷却 Li 原子集団を保持するための超高真空チャンバー(図2)の設計・構築を行なった。この真空チャンバーは低速Li原子ビームを生成する低真空度のオープンチャンバー(上流側)と、実際にLi原子のレーザー冷却・捕捉を行なう超高真空度のメインチャンバーから構成されており、最終的に原子オープン使用時でもメインチャンバー側において 3×10^{-11} Torr という超高真空度を達成した。これは将来、量子縮退領域まで冷却された冷却Li原子集団を安定に保持するのに十分な真空度である。また原子トラップ領域には合成石英製ガラスセルを導入し、将来的な光格子構築のための全方向からの光学アクセスを可能とした。なお、低速Li原子ビームの生成には Zeeman 減速法ではなく、近年Li原子系でも導入事例が増えてきた永久磁石を用いた2次元磁気光学トラップを導入した。

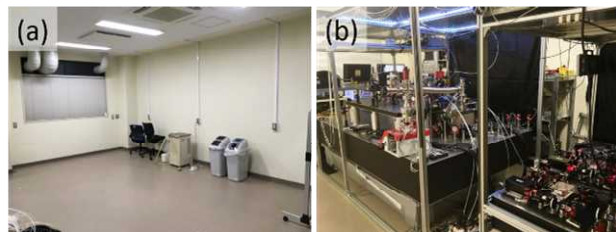


図1：新規実験室の整備。(a) 本研究課題開始時。(b) 2020年12月現在の様子。手前が自作レーザー冷却光源系、奥が超高真空チャンバー系。

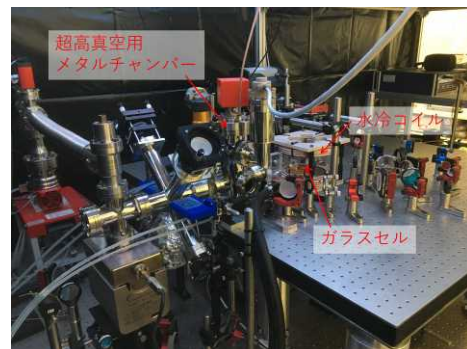


図2： ${}^6\text{Li}$ 原子のレーザー冷却を実現するための超高真空チャンバーおよびコイル。

また、研究テーマ B で詳述するように Li 原子の磁場フェッシュバツハ共鳴を利用するための水冷ヘルムホルツコイル系を構築した。このヘルムホルツコイルは絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ(IGBT)の H ブリッジ回路により四重極磁場生成用のアンチヘルムホルツコイルに電流を切り替えることができる。この四重極磁場と上記の周波数安定化されたレーザー冷却光(Cooling 光および Repump 光)を組みわせることで、3 次元磁気光学トラップ(3D-MOT)を実現し、超高真空ガラスセル中での⁶Li 原子のレーザー冷却・捕捉を実現した(図 3)。今後は圧縮 MOT 後、光トラップに移行し、蒸発冷却により量子縮退領域までの冷却を目指す。

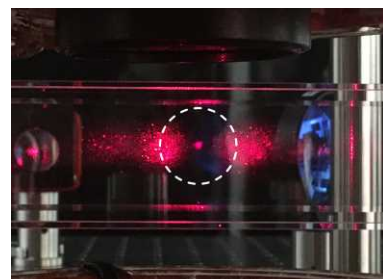


図 3 : 3D-MOT によりガラスセル中で冷却・捕捉された⁶Li 原子集団。

研究テーマ B: 非時間順序相関関数(OTOC)の測定

本研究課題では、量子情報スクランプリングの指標として近年注目されている非時間順序相関関数(OTOC)を光格子中の冷却原子系で測定することを中期の目標としている。この OTOC は $C(\tau) = \langle W^\dagger(\tau) V^\dagger(0) W(\tau) V(0) \rangle$ の形で与えられる相関関数で、 W と V は操作を表す。これには「時刻 τ で操作 W を加えてから時刻 0 で操作 V を加える」という逆向きの時間発展が含まれており、OTOC の測定には「時間反転操作」、すなわちハミルトニアン H の符号を高精度に反転する制御が必要となる。本研究では光格子中の冷却原子系を記述するハミルトニアン(Hubbard ハミルトニアン)の二つのパラメータ、①オンサイト相互作用 U と、②トンネリング t の符号を、それぞれ①磁場フェッシュバツハ共鳴による原子間相互作用の制御、②光格子ポテンシャルの周期変調(Floquet 制御)により反転し、Hubbard ハミルトニアン全体の符号を反転させることを目指している。①を実現するためには、⁶Li 原子の磁場フェッシュバツハ共鳴近傍まで到達する強磁場(～800 G)を生成する必要があるが、一方で、この磁場を高速に制御するためには、コイルの巻き数(インダクタンス)を増やすことは出来ない。そこで本研究では、中空銅管を 27 巻したコイル 2 つをヘルムホルツ配置にした水冷コイルを作成した。このコイルは 1 A の電流に対しておよそ 2.6 G の磁場を生成し、330 A の電流(～850 G の磁場に相当)でも 30 秒程度であれば 50°C 程度の加熱に収まることを確認している。また②の光格子の周期変調によるトンネリングの符号反転では、変調により生じる上のバンドへの励起が問題となる。この問題は光格子ポテンシャルを深くして上のバンドとのギャップを大きくすることで改善できるが、一方、光格子ポテンシャル光を強くして光格子を深くすると、光格子ポテンシャル光からの光散乱による加熱が増加する。このような光散乱は時間反転操作に対するデコヒーレンスになると考えられることから、本研究ではこの光散乱の影響を可能な限り低減するため、先行研究の光格子系で用いられてきた波長 1064 nm のレーザーではなく、Li 原子の共鳴(671 nm)からより離れた波長 1560 nm の高出力狭線幅ファイバーレーザーを導入した。この光格子波長では、同じトンネリング時間(～10 ms)と比較した場合には光散乱レートは 1064 nm 光を用いた場合の 10 分の 1 以下となり、ダイナミクスを観測する程度の時間(～100 ms)であれば光散乱の影響は無視できると期待できる。

研究テーマ A で述べたように、現時点では⁶Li 原子のレーザー冷却がまだ量子縮退領域に達していないため、原子集団を光格子ポテンシャルへ導入することは出来ておらず、OTOC 測

定には至っていないが、OTOC についての研究論文を持つ理論家の吉井涼輔氏と共に、R2 年度より基盤研究(B)の研究課題「孤立量子系の熱化における情報の局所性而非局所化-冷却原子を用いた実証に向けて-」を開始しており、さきがけ期間後の OTOC 測定実現のための準備を着実に進めている。

研究テーマ C: 量子多体系における量子情報ダイナミクスの研究

本研究課題開始時の研究テーマ C では、ブラックホールの量子ダイナミクスにより近いふるまいを示す可能性のある超流動-Mott 絶縁体量子相転移点近傍での OTOC 測定を実現するために、ボソン同位体 Li 原子(${}^7\text{Li}$)を導入する想定であった。しかし共同研究者と議論を重ねる中で、OTOC 測定はブラックホールの量子カオス性の指標のみならず、より一般の量子多体系においても情報の非局所化の指標・量子相の特徴付けとして重要であるとの理解が進み、さらにイオントラップ量子コンピュータを用いた少量量子ビットのブラックホールのトイモデルでの OTOC 測定がなされたことから、長期的なねらいをブラックホールではなく、より一般の量子多体系における量子情報の非局所化の評価に切り替えた。上述の基盤研究(B)はこの方向の研究を進めるためのものでもある。また R2 年度は新型コロナウイルス感染症の拡大により4月末から6月まで、研究者の所属する大学もリモートワークとなったが、この期間に研究テーマ C と関連する共同研究者と議論を重ね研究提案を行なった。なお、この研究テーマ C と直接関係する訳ではないが、新型コロナウイルス感染症の拡大により多くの研究会が中止となったことを受けて、主にこの状況で欧米に残って研究を続ける若手研究者に講演を依頼する形で、冷却原子系のオンラインセミナー「アトムの会」を世話人として複数回開催した(研究テーマ C に関連するセミナー発表も開催)(「(3)その他の成果」参照)。

3. 今後の展開

研究成果で述べたように、 ${}^6\text{Li}$ 原子のレーザー冷却(3次元磁気光学トラップ)まで実現できしており、今後は当該研究予算で既に購入・評価が済んでいる波長 1070 nm の高出力ファイバーレーザーを用いた光トラップへ移行し、蒸発冷却による量子縮退領域までの冷却を速やかに実現する。さらに、同様に当該研究予算で既に購入・評価が済んでいる波長 1560 nm の狭線幅高出力ファイバーレーザーにより光格子系を構築し、研究テーマ B である OTOC 測定の実現を目指す。一方で、OTOC 測定は、時間反転操作中のデコヒーレンス抑制など、より長期に渡り対応・研究が必要となる可能性もあることから、OTOC 測定とは別の研究テーマ C に沿った研究、具体的には研究者らの先行研究[1]のような量子散逸の強い系における量子情報の局在化と非局在化、観測誘起量子相転移[2]の研究も検討を進めている。

[1] T. Tomita, S. Nakajima *et al.*, *Science Advances* **3**, e1701513 (2017).

[2] Y. Li *et al.*, *Phys. Rev. B*, **98**, 205136 (2018).

4. 自己評価

本研究では、OTOC の測定が可能となる高い制御性を持つ冷却原子系をゼロから構築することを目指した。ゼロからのスタートかつ予算と人手の制限から当初計画よりも装置開発に時間がかかり、OTOC の測定までには至らなかった。しかし、新規かつ独立した実験室・実験装置を立ち上げることができ、さらにその装置で Li 原子のレーザー冷却まで達成したことで、

研究者が今後、冷却原子実験分野の独立した研究者として研究を推進するための研究基盤の形成ができた。また、研究開始当初は OTOC 測定の意義をブラックホール情報消失問題との関連で認識していたが、当該さきがけ領域の他研究者を含む共同研究者との議論の中で、OTOC をより一般の量子多体系における量子情報の非局在化の指標として理解することができ、結果としてこの方向での理論家との共同研究の開始、科研費の獲得につながったことは、本さきがけの先につながるものと期待できる。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数:0件

(2) 特許出願

研究期間累積件数:0件(特許公開前のもも含む)

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

【国際会議(招待講演)】

1. Shuta Nakajima, “Cold atom experiments towards an understanding of gravity”, Visions for table-top experiments on dark matter, Kavli IPMU, University of Tokyo, Japan (2019年2月).

【国内会議(招待講演)】

2. 中島秀太, 「動的光格子による冷却原子系の操作」, 量子エレクトロニクス研究会「光操作の最前線」, 上智大学軽井沢セミナーハウス (2017年12月).
3. 中島秀太, 「冷却原子系を用いた量子シミュレーション」(基調講演), 物性研短期研究会 量子情報・物性の新潮流, 東京大学柏キャンパス 物性研究所 (2018年8月).
4. 中島秀太, 「冷却原子系を用いた量子シミュレーション」, シミュレーションによる宇宙の基本法則と進化の解明に向けて (QUCS 2019), 京都大学基礎物理学研究所 (2019年12月)

【オンライン研究会の開催】

- 「アトムの会」オンラインセミナー
世話人, オンライン開催(2020年6月~).
<http://www.sci.osaka-cu.ac.jp/phys/laser/atomnokai/index.html>
- 第2回冷却原子研究会「アトムの会」

世話人, オンライン開催(2020年9月).

- 量子情報春の学校 2021

世話人, オンライン開催(2021年3月).

<https://sites.google.com/view/qinfospring2021/>